

0-774032


На правах рукописи

САГАДЕЕВ ГУМЕР ИЛЬДАРОВИЧ

**АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ПО
ШИРОКОПОЛОСНОМУ СИГНАЛУ, ДЛЯ СРЕДСТВ СВЯЗИ
БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ.**

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Казань 2009

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете
им. А.Н. Туполева

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники РТ,
докт. техн. наук, профессор
Седельников Ю.Е.

Официальные оппоненты:

докт. физ-мат. наук, профессор Ибатуллин Э.А.
канд. техн. наук Степанов В.В.

Ведущая организация:

ОАО ОКБ «Сокол» г.Казань

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 212.079.04
при Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполе-
ва "20" февраля 2009г. в 13⁰⁰ часов по адресу: 420111, г. Казань,
ул. К. Маркса, 10

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государствен-
ного технического университета им. А.Н.Туполева по адресу: Казань,
ул. К. Маркса, 10

Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим выслать по
адресу: 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

Автореферат разослан "16" марта 2009г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000555435

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор

В.Р. Линдваль

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время во всех развитых странах проявляется большой интерес к беспилотной летательной технике, используемой для решения широкого спектра как военных, так и гражданских задач, многие из которых можно охарактеризовать тремя определениями – монотонные, «грязные» и опасные. Прежде всего, речь идет о задачах, где применение беспилотной летательной техники более оправдано, а именно, когда требуется: длительное и монотонное выполнение функций поиска и наблюдения; мониторинг объектов, нахождение возле которых опасно (например, районы радиационных аварий); боевые вылеты в районы, хорошо защищенные средствами ПВО, в которых существует высокий риск потери летательного аппарата. Применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) перспективно и в тех областях, где отсутствие пилота позволяет сделать летательный аппарат более компактным и дешевым.

В настоящее время беспилотные аппараты совместно с бортовым и наземным оборудованием рассматриваются как единые беспилотные авиационные комплексы (БАК), решающие определенные гражданские или военные задачи. В состав указанных комплексов входит специализированное бортовое оборудование, средства радиосвязи и наземные средства управления и обработки информации. Работоспособность БАК в целом, и выполнение поставленных задач в частности, напрямую зависят от надежности функционирования линии радиосвязи. К числу основных требований, предъявляемых к ним, помимо собственно передачи информации в требуемом объеме, можно отнести также живучесть, скрытность работы и помехозащищенность.

Наиболее остро стоит вопрос обеспечения радиосвязи в БАК с БЛА среднего класса, т.к. с одной стороны, они могут оснащаться не только телевизионными камерами, но и более информативным оборудованием, с другой, имеют значительный радиус действия, достигающий пределов прямой видимости. Создание высокоэффективной аппаратуры радиосвязи для них представляют определенные трудности. В последнее время рассматривается использование в этих целях систем радиосвязи с широкополосными и даже сверхширокополосными сигналами.

Таким образом, задача совершенствования тактико-технических характеристик аппаратуры радиосвязи воздушного объекта с наземным пунктом управления является актуальной.

Предметом исследования в настоящей работе является аппаратура связи и управления перспективных БАК. Объект исследования – антенные устройства наземной и бортовой составляющих в составе указанных комплексов.

Целью работы является улучшение тактико-технических характеристик аппаратуры радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами.

Задача, решаемая в диссертации, состоит в разработке методов повышения энергетического потенциала и помехозащищенности линии связи с беспилотным летательным аппаратом на основе использования антенных решеток с диаграммами направленности, синтезированными по широкопо-

лосному сигналу. Решение ее требует рассмотрения частных взаимосвязанных задач:

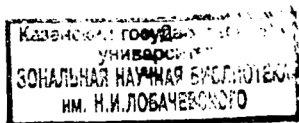
- анализа требований к электрическим характеристикам бортовых и наземных антенн, выработки критериев и оптимизации указанных требований;
- разработки методов синтеза ДН малоэлементных бортовых антенных решеток средств связи, использующих широкополосные сигналы, в соответствии с выработанными требованиями и критериями;
- разработки метода формирования направленных свойств антенных решеток наземной аппаратуры связи, использующих широкополосные сигналы, и оптимизацию их в соответствии с выработанными критериями;
- проведения количественной оценки эффективности предлагаемых мер по улучшению показателей антенн радиосредств связи с БЛА;
- выработки предложений по практической реализации указанных методов и технических решений.

Научная новизна заключается в том, что в работе впервые получены следующие результаты:

- сформулированы требования к электрическим характеристикам бортовых и наземных антенн для средств связи с БЛА, предложены и обоснованы критерии качества антенн;
- предложено использование в качестве бортовых антенн малоэлементных антенных решеток с диаграммами направленности, синтезированными по широкополосному сигналу, предложены методы расчета и оптимизации их характеристик и параметров в соответствии с выработанными критериями;
- предложено использование антенных решеток с диаграммами направленности, синтезированными по широкополосному сигналу, в качестве наземных антенн, разработаны методы расчета и оптимизации их характеристик и параметров в соответствии с выработанными критериями;
- показано, что использование предложенных подходов и приемов при создании бортовой аппаратуры позволяет существенно повысить потенциал связи и улучшить помехозащищенность канала связи;
- предложена методика пространственно-частотной фильтрации сигналов в многоканальной приемной системе, осуществляемая путем совместного выбора спектрального состава сигналов и параметров весовой обработки, позволяющая осуществлять эффективную селекцию сигнала от выбранного корреспондента при существенном ослаблении приема сигналов в общей полосе частот от других корреспондентов. Представлены результаты расчетов, подтверждающие эффективность предлагаемого подхода, даже для систем с умеренным расширением полосы частот.

Методы исследования. Для достижения поставленных целей в работе использованы методы имитационного моделирования, математические методы оптимизации, математические методы прикладной электродинамики. При проведении расчетов применены современные пакеты прикладных программ Mathcad и Matlab.

Достоверность результатов работы определяется корректным использованием электродинамических моделей анализируемых объектов, использо-



ванием методов анализа, апробированных в аналогичных электродинамических задачах, а также результатами имитационного моделирования.

Теоретическая значимость и практическая ценность полученных результатов.

Использование разработанных подходов позволяет улучшить тактико-технические показатели БАК воздушного мониторинга окружающей среды и технических объектов. Конкретный результат, достигаемый в результате использования методик и рекомендаций, содержащихся в материалах диссертации, состоит в возможности:

- увеличения энергетического потенциала линии радиосвязи, что, в частности, позволяет снизить мощность бортовых радиопередатчиков;
- улучшения показателей помехозащищенности бортовой и наземной составляющих аппаратуры радиосвязи, достигаемого путем осуществления эффективной пространственной селекции, в том числе сигналов разных корреспондентов в общей полосе частот

Апробация результатов диссертации.

Результаты диссертационной работы докладывались на XI, XII, XIII, XIV и XV Международных молодежных НТК "Туполевские чтения" в 2003-2007 г.г., VIII Международной НТК «VIII Королёвские чтения» Самара 2005, XVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» Казань 2005г, IV Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» Н. Новгород 2005, Международной НТК «Авиакосмические технологии и оборудование» Казань 2006, VI Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» Казань 2007г., IX Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» Казань 2008 г.

Публикации.

По результатам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 11 - в трудах Международных и национальных научно-технических конференций, 3 – в виде статей в научно-технических журналах, в том числе 2 статьи в изданиях согласно Перечню ВАК.

Использование результатов диссертации и пути дальнейшей реализации. Результаты диссертации в виде методик, рекомендаций, а также количественных оценок нашли практическое использование в работах ОАО «ОКБ «Сокол», а также в учебном процессе ИРЭТ КГТУ им. А.Н.Туполева. Пути дальнейшей реализации связаны с разработкой приемо-передающих систем связи нового поколения, использующих широкополосные и сверхширокополосные сигналы, в которых антенна и приемник участвуют как единая система. Разработанные подходы и приемы позволяют улучшить направленные свойства антенных систем в целях улучшения энергетических параметров радиолиний и повышения помехозащищенности.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

- Методики определения и оптимизации характеристик направленности бортовых и наземных антенн средств связи с БЛА, а также критерии для оценки их качества;

- Использование антенных решеток с диаграммами направленности, синтезированными по широкополосному сигналу, в качестве антенн бортовой аппаратуры, методика и результаты оптимизации их показателей;
- Использование антенных решеток с диаграммами направленности, синтезированными по широкополосному сигналу, для аппаратуры наземного пункта управления, методика и результаты оптимизации их показателей;
- Оценки эффективности предлагаемых мер и технических решений, подтверждающие возможность существенного увеличения мощности принимаемого сигнала и повышения помехозащищенности канала связи.

Структура и состав диссертации.

Диссертация содержит 105 стр. текста, список использованных источников, включающий 98 наименований, в том числе 14 работ автора.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор современного состояния беспилотных авиационных комплексов, отмечены тенденции их развития. Отмечено, что активизируются работы в области создания боевой беспилотной авиации, причем имеющиеся в доступных источниках данные свидетельствуют о большом многообразии перспективных средств, различающихся по характеру и степени сложности выполняемых задач в условиях боевого применения.

Информационная сторона занимает особое место в концепции беспилотной боевой авиации. Общим положением для всех существующих концепций по рассматриваемому вопросу является взгляд на применение беспилотной боевой авиации "как на формирование некоторой информации, ее передачу и обработку с целью реализации определенных боевых действий". Независимо от способов применения и выполняемых задач пилотируемые и беспилотные самолеты наиболее эффективны тогда, когда они функционируют в рамках единой информационной сети. Отмечается, что специалисты многих государств исследуют концепцию ведения боевых действий вооруженными силами в едином информационном пространстве (Network Centric Warfare), отводя при этом значительную роль беспилотным летательным аппаратам.

Работоспособность системы в целом и выполнение поставленных задач зависит от надежности функционирования линий радиосвязи. Среди важнейших требований, предъявляемых к линии радиосвязи, можно выделить требования пропускной способности, живучести, скрытности работы и помехозащищенности. В настоящее время, как один из наиболее эффективных способов улучшения качественных показателей средств радиосвязи, рассматривается использование сигналов сложной формы (широкополосных, шумоподобных) с оптимальной обработкой их на приемной стороне. Использование широкополосных сигналов в системах связи способствует существенно улучшению их технических показателей. К числу дополнительных резервов для их совершенствования относится использование бортовых и наземных антенн, построенных с учетом специфических свойств широкополосных сигналов, что позволяет обеспечить дальнейшее улучшение основных пока-

зателей средств радиосвязи. В частности, использование в средствах связи с широкополосными сигналами многоэлементных антенн открывает возможность для ослабления влияния неизбежных интерференционных провалов в ДН бортовых антенн, расположенных на объектах сложной формы, а также для улучшения пространственной селекции сигналов и помех.

Во введении формулируется цель диссертационных исследований, заключающаяся в улучшении тактико-технических характеристик аппаратуры радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами (БЛА), формулируется основная задача, решаемая в диссертации, и определяются пути, позволяющие достигнуть поставленную цель.

В главе 1 рассматриваются требования, предъявляемые к антенным устройствам средств связи в составе БАК и основные направления реализации. Выполнение требований к основным техническим показателям, определяющим функционирование системы связи в составе БАК, зависит от значительного числа параметров, которые могут быть разделены на две группы. К первой из них относятся параметры, определяющие архитектуру системы, частотный диапазон, структуру радиосигналов, свойства приемника и устройств обработки информации и др. Ко второй – параметры антенн. Требования к параметрам антенн формулируются исходя из того, что при фиксированных параметрах первой группы, показатели качества радиолинии, в общем случае, монотонно зависят от ряда параметров антенн. В качестве основных анализируемых показателей системы связи БАК выделены:

- показатель, определяющий качество передачи информации, монотонно зависящий от уровня сигнала на выходе приемной антенны. Требования к электрическим параметрам антенн определяются исходя из данного показателя. На этой основе сформулирована задача улучшения технических показателей радиолиний по направлениям «БЛА – наземный пункт управления (НПУ)» и «НПУ-БЛА» как задача обеспечения требуемых направленных свойств наземных и бортовых антенн. Отмечено, что особое внимание должно быть обращено на улучшение показателей радиолинии «БЛА-НПУ».

- показатель помехозащищенности радиолинии, монотонно зависящий от соотношения уровней принимаемого сигнала и помехи (помех). В главе I сформулированы требования к показателям антенн, непосредственно влияющим на свойства помехозащищенности радиолиний с учетом различающихся, в общем случае, направлений прихода и поляризации помех и сигнала. С этой точки зрения антенны должны обеспечивать по возможности лучшее соотношение уровней принятых сигнала и помехи:

$$\frac{P_c(\theta_c, \varphi_c)}{P_n(\theta_n, \varphi_n) + P_{шум}} = Q_{из} \rightarrow \max. \text{ Указанный критерий, в зависимости от смысла}$$

задачи, формализованный как минимаксный или среднеквадратический, используется в качестве показателя, определяющего свойства антенн с точки зрения помехозащищенности радиолинии связи.

Рассмотрены существующие пути улучшения введенных показателей бортовой аппаратуры радиосвязи. Отмечено, что для бортовых антенн, размещаемых на БЛА, как и на любых объектах сложной формы, основные про-

блемы связаны с неравномерностью диаграмм направленности (ДН), в частности с наличием интерференционных провалов. Проведен анализ известных мер, направленных на улучшение равномерности ДН бортовых антенн – оптимальный выбор расположения антенн на корпусе ЛА, прием с переключением, использование антенных решеток, в том числе некогерентных. В силу принципиальных причин указанные методы далеко не всегда могут эффективно решать поставленную задачу. В частности, использование многоэлементных антенн, хотя принципиально и позволяет обеспечить формирование квазиизотропных ДН, имеющих не более двух направлений нулевого излучения при линейной поляризации, требует при приближении к физическому пределу неограниченного увеличения размеров апертуры.

Рассмотрение известных приемов повышения равномерности ДН квазиизотропных бортовых антенн позволяет сделать вывод о том, что в рамках традиционных средств решения и для классических узкополосных систем связи возможности совершенствования электрических показателей бортовых антенн практически исчерпаны. Использование перспективных систем связи с широкополосными сигналами открывает в этом плане новые возможности.

В главе 1 также проведен анализ требований, предъявляемых к антеннам типовых наземных пунктов связи. Отмечается, что требования к их направленным свойствам вытекают из условия обеспечения в режиме передачи максимально возможных значений плотности потока мощности в любой точке возможного нахождения БЛА. Таким образом, наилучшая ДН антенны должна соответствовать условию максимума наименьшего из возможных значений указанной величины с учетом влияния подстилающей поверхности и затухания в атмосфере.

Реализация этого условия фактически означает необходимость использования антенн с управляемыми ДН и высокими значениями коэффициента усиления. Отмечено, что хотя реализация указанного требования не ограничена фундаментальными свойствами антенн, практически всегда действуют те или иные ограничения, связанные с факторами стоимости, габаритами аппаратуры и др. Для многих практических случаев одним из наиболее удачных вариантов является использование антенн, имеющих управляемые или неуправляемые секторные ДН в азимутальной плоскости и специальной формы по углу места. В диссертации определены указанные оптимальные ДН антенны НПС для ряда характерных ситуаций, когда летательный аппарат совершает полет по известной траектории, по одной из возможных заданных траекторий; по одной из возможных траекторий при возможности изменения пространственного положения НПС, когда летательный аппарат может находиться в произвольной точке пространства в пределах заданной области.

Формирование заданных ДН в азимутальной плоскости, в том числе с управляемым положением луча, наиболее естественно осуществлять путем использования антенных решеток. Для средств связи с широкополосными сигналами с использованием антенных решеток открываются дополнительные возможности для улучшения направленных свойств антенн. Для этого в

работе используется подход, отличающийся от традиционного, требующего неизменности основных параметров антенн в пределах полосы частот широкополосного сигнала. Используемый подход основан на принципе синтеза ДН по широкополосному сигналу в антенной системе с частотно-зависимой ДН. В его основу положено рассмотрение пространственного приема и временной (частотной) обработки как единого процесса, в котором антенна и приемник участвуют как единая система¹. Использование этого принципа открывает дополнительные возможности по улучшению направленных свойств антенн бортовой и наземной аппаратуры БАК, построенных с учетом широкополосности сигнала.

В главе 2 рассматриваются бортовые антенны с ДН, синтезированными по широкополосному сигналу. Отмечены особенности работы аппаратуры радиосвязи БЛА, роль и особенности выполнения антенн в виде антенных решеток. К указанным особенностям можно отнести то обстоятельство, что связь, как правило, осуществляется с одним наземным пунктом управления (НПУ). Однако в процессе полета БЛА может принимать различные положения по отношению к НПУ, что и приводит к требованию квазизотропности ДН антенн в пределах заданного телесного угла. Организация двухсторонней связи с наземным пунктом включает функции приема и передачи, выполняемые бортовой аппаратурой и, соответственно, предъявляет указанные требования к бортовым антеннам как к передающим, так и приемным. Кроме того, в зависимости от характера задач, решаемых БАК и наличия технических возможностей по оснащению аппаратными средствами и размещению антенн на БЛА, можно рассматривать как приемные, так и передающие антенны с управляемыми и неуправляемыми ДН.

Представлена модель антенной решетки и сформулирован принцип синтеза бортовой антенной решетки в общем случае. Указано, что ДН по широкополосному сигналу представляет собой результат совместной пространственно-частотной фильтрации, осуществляемой приемной системой, включающей многоэлементную антенну и приемное устройство с многоканальной частотной обработкой сигналов, принятых элементами антенн. В такой системе результирующая ДН по широкополосному сигналу может быть представлена в виде:

$$\dot{F}_E(\theta, \varphi) = c \int_{\omega_1}^{\omega_2} \langle \dot{S}(\theta, \varphi, \omega) \rangle \| K(\omega) \rangle d\omega,$$

где $\langle \dot{S}(\theta, \varphi, \omega) \rangle$ - матрица-строка спектра принятого сигнала на выходе системы излучателей приемной антенны и $\| K(\omega) \rangle$ - матрица-столбец весовой функции, определяющей обработку в приемной системе.

В свою очередь, величины $\langle \dot{S}(\theta, \varphi, \omega) \rangle$ определяются спектром передаваемого сигнала $G(\omega)$ и зависят от параметров передающей антенны $\langle \dot{S}(\theta, \varphi, \omega) \rangle = G(\omega) \langle K_{\text{пр}}(\omega, \theta, \varphi) \rangle$, где функции, $\langle K_{\text{пр}}(\omega, \theta, \varphi) \rangle$ - представляют собой

¹ Существо именно такого подхода сформулировано И.Я.Имморесевым (Проблемы антенной техники. Под ред. Л.Д.Бахраха и Д.И.Воскресенского М.:Радио и связь, 1989.стр. 66-87).

коэффициенты передачи радиоканала, включающего передающую антенну и соответствующий элемент приемной антенной решетки. Таким образом, при фиксированных параметрах одной из антенн и радиотрассы управление результирующей ДН можно осуществлять как изменением спектра передаваемого сигнала $G(\omega)$, так и весовой функции $|K(\omega)|$, а также их совместным изменением. Принцип синтеза ДН антенны по широкополосному сигналу в общем случае состоит в целенаправленном выборе спектра передаваемого сигнала $G(\omega)$ и весовой функции $|K(\omega)|$ с целью получения результирующей ДН с требуемыми свойствами.

Применительно к бортовым антеннам средств радиосвязи, выделены задачи улучшения показателей антенной системы БЛА в режимах приема и передачи. В первом случае варьируемыми параметрами являются значения вектора столбца весовой функции $|K(\omega)|$, определяющей обработку сигналов в приемной системе при неизменных спектральном составе сигнала и параметрах передающей антенны НПУ. В режиме передачи варьируются, в общем случае, спектр передаваемого сигнала и параметры бортовой антенны, аналогичные амплитудно-фазовому распределению и определяющие значения величин $\langle K_{\text{пр}}(\omega, \theta, \varphi) \rangle$ при условии оптимальной обработки принятого сигнала в приемной системе НПУ.

Каждая из указанных задач рассматриваются в двух вариантах, соответствующих принципу управляемых и неуправляемых ДН бортовых антенн. Принцип управляемых ДН заключается в том, что в малоэлементной бортовой антенной системе предусмотрена возможность изменения соответствующих параметров – весовых коэффициентов $|K(\omega)|$, параметров амплитудно-фазового распределения, влияющих на величины $\langle K_{\text{пр}}(\omega, \theta, \varphi) \rangle$, а также спектра передаваемого сигнала с целью обеспечения наибольшего излучения в направлении на НПУ или наилучшего приема радиопередач от НПУ, соответственно текущим изменениям взаимной ориентации БЛА и НПУ. При неуправляемых ДН в режимах приема и передачи указанные параметры выбираются неизменными, исходя из требования максимально возможной степени изотропности антенн в заданных телесных секторах углов.

Для перечисленных вариантов сформулированы и решены задачи оптимизации передающей и приемной бортовых антенн, а также задача синтеза бортовой приемной антенны с компенсацией приема помехи. Рассмотренные задачи проиллюстрированы на модельном примере, соответствующем случаю расположения антенн на объекте цилиндрической формы при различном числе их и расположении на объекте. Показано, что использование предложенной методики позволяет добиться значительного улучшения показателей радиолинии не только при использовании управляемых ДН, но и фиксированных (неуправляемых), сформированных по широкополосному сигналу с постоянным спектральным составом и параметрами амплитудно-фазового распределения или соответствующими весовыми коэффициентами.

Полученные численные результаты свидетельствуют о возможности существенного улучшения показателей как управляемых, так и неуправляемых

бортовых антенн. Приведенные расчеты демонстрируют возможность увеличения результирующего КУ антенны, состоящей из нескольких элементов, в режиме приема от 14 до 70 раз, в режиме передачи - от 2 до 16 раз, при увеличении относительной частотной полосы до 17%. Показано, что использование предложенного метода при синтезировании ДН приемных антенн приводит к более ощутимому выигрышу и обсуждены причины данного эффекта.

В главе 3 рассматриваются вопросы построения приемных антенн НПС с ДН, синтезированными по широкополосному сигналу. Особенности их связаны как с необходимостью организации связи с несколькими БЛА при их различных ракурсах относительно НПУ, так и с тем, что различные корреспонденты связи могут использовать сигналы, различающиеся по структуре или спектральному составу. Кроме того, необходимо учитывать возможность присутствия источников помех, причем направления прихода полезных сигналов и помех могут быть как различными, так и достаточно близкими. Исходя из перечисленных особенностей, предложено в качестве наземной антенны использовать антенну с управляемой ДН, синтезированной по широкополосному сигналу.

Рассмотрена модель приемной антенной системы из N элементов, синтезированной по широкополосному сигналу. Результирующая ДН ее по отношению к сигналу «своего» передатчика со спектральным составом $G^{(s)}(\omega)$ может существенно отличаться от ДН по отношению к сигналу от другого корреспондента (или, соответственно, помехи) со спектром $G^{(k)}(\omega)$:

$$F^p(\theta, \varphi) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sum_{n=1}^{n=N} G^{(p)}(\omega) \mathbf{e}_n(\omega, \theta, \varphi) \dot{K}_n(\omega) d\omega,$$

где индекс $p=s$ или $p=k$ относится к случаям приема сигнала и помехи соответственно.

Для рассматриваемых приложений синтез заданной диаграммы направленности по широкополосному сигналу состоит, в общем случае, в выборе весовых функций $\dot{K}_n(\omega)$ и спектрального состава ансамбля сигналов $G^{(p)}(\omega)$, $p=1, \dots, s, \dots, M$, согласно некоторому критерию качества $Q(K(\omega), G^{(s)}(\omega), G^{(k)}(\omega))$. Выбор этого критерия, в свою очередь, определяется поставленной целью и отражает соответствие некоторой совокупности требований к показателям направленности многоэлементной системы с обработкой сигнала.

В главе 3 сформулирована и решена задача синтеза ДН приемной системы, осуществляющей наилучший прием сигнала со спектром $G^{(s)}(\omega)$, приходящего с заданного направления (θ_s, φ_s) , при условии исключения приема помехи со спектром $G^{(k)}(\omega)$, приходящей с направления (θ_k, φ_k) . Показано, что при произвольном фиксированном сочетании направлений прихода сигнала (θ_s, φ_s) и помехи (θ_k, φ_k) , включая их совпадение, возможно полное исключение нежелательного приема (без учета влияния погрешностей реализации) при отсутствии дополнительных энергетических потерь, практически

всегда имеющих место при использовании классических ФАР с формированием управляемого провала в ДН. Необходимым условием этого является ортогональность спектров сигнала $G^{(1)}(\omega)$ и помехи $G^{(2)}(\omega)$ с некоторым весом $\Lambda(\omega, 0, \varphi, 0, \varphi_s)$, зависящем от парциальных ДН элементов антенной решетки. На основании этого делается вывод о невозможности осуществления идеальной селекции при неизменных частотных свойствах сигнала и изменяющемся пространственном положении источников сигнала и помехи. В этих случаях, в перспективе, селекция может осуществляться на основе адаптации параметров сигнала к помеховой обстановке.

На модельных примерах показана возможность ослабления приема помехи в антенной системе из 6...8 элементов и равному им числу частотных каналов. Приведенные результаты расчетов подтверждают возможность полного исключения приема помех с заданного направления без энергетических потерь, при сохранении уровня приема полезного сигнала. При этом при настройке системы на фиксированное направление прихода помехи и действительном его изменении в широких пределах сохраняется существенное ослабление нежелательного приема, составляющее даже в худшем случае величину не менее 18 дБ.

В главе 4 рассматриваются принципиальные вопросы, связанные с практической реализацией наземных и бортовых антенн, синтезированных по ШП сигналу.

Для организации расчетных процедур синтеза антенной решетки, установленной на объекте сложной геометрической формы, необходимо предварительное вычисление парциальных ДН ее элементов как комплексных векторных функций частоты. Используемые методы должны обеспечивать достаточную точность при разумной трудоемкости расчетов. В этих целях предлагается использовать метод моментов для проволочной модели небольших электрических размеров и асимптотические методы для объектов больших размеров. Приводится соответствующее обоснование.

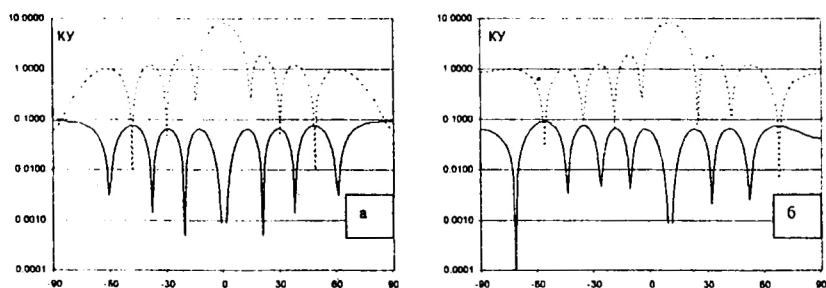


Рис. 1 Угловые зависимости КУ 8-ми элементной антенной решетки с обработкой в 8 частотных каналах. Стопшие линии – p – Я сигнал (помеха), пунктирные линии – s – Я сигнал (полезный сигнал).

Состав спектра $G_m^{(1)} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, $G_m^{(2)} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$.

Направление прихода полезного сигнала: а) 0° , б) 10° .

Проведена оценка эффективности использования методов синтеза ДН по широкополосному сигналу применительно к бортовым антенным БЛА типовых размеров и формы. Для количественных оценок выбран, как наиболее востребованный, летательный аппарат среднего класса (обоснование приводится). Оценена эффективность синтезированных антенн в режимах передачи и приема в управляемом и неуправляемом вариантах. Результаты расчетов показывают, что уже при использовании 3-х элементной антенны при 2 частотных каналах может достигаться энергетический выигрыш, в случае использования приемной управляемой антенной системы как горизонтальной, так и вертикальной поляризации, по среднему значению КУ до 23 раз. Также показана возможность существенного уменьшения глубины провалов в неуправляемых ДН. Так для приемной неуправляемой антенны из 3 вибраторов при 2 частотных каналах глубина наибольшего интерференционного провала уменьшается до 2,5 раз. Проведенные оценки дают основание сделать вывод об эффективности использования антенн с ДН, синтезированными по широкополосному сигналу, в составе бортовых средств радиосвязи с подвижными объектами.

Для антенных устройств наземной аппаратуры связи и управления, на основании положений, изложенных в Главе 1, предложена схема выполнения в виде линейной антенной решетки, с синтезированной по ШПГ сигналу ДН в горизонтальной плоскости и ДН специальной формы – в вертикальной плоскости. Описана методика определения формы указанной ДН в вертикальной плоскости, исходя из типовых условий применения БЛА. Показано, что использование ДН специальной формы позволяет обеспечить энергетический выигрыш до нескольких дБ.

Для осуществления расчетных процедур, связанных с проектированием наземных антенных решеток, синтезированных по широкополосному сигналу, необходимо определение частотных зависимостей парциальных диаграмм направленности элементов решетки с учетом их взаимной связи. В Главе 4 проведен анализ возможных способов учета явлений взаимной связи элементов решеток и показана возможность использования в этих целях простейших из существующих матричных моделей.

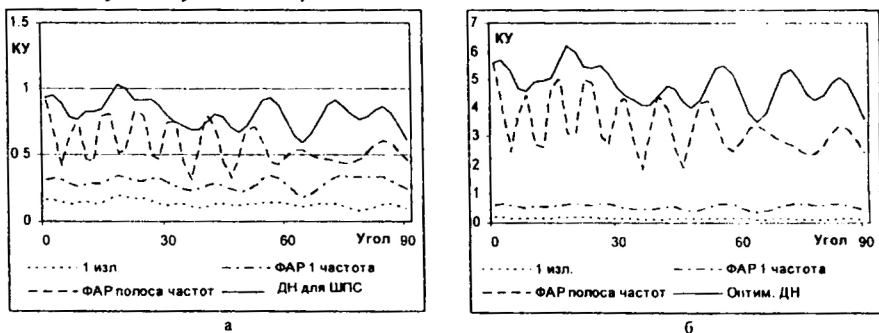


Рис.2. Графики КУ антенной системы БЛА (азимутальная плоскость):
а - Графики КУ. Режим передачи. б - Графики КУ. Режим приема.

Проведены оценки эффективности использования антенных решеток наземной приемной аппаратуры, синтезированных по широкополосному сигналу в зависимости от числа излучателей и числа частотных каналов. Показано, что выигрыш в соотношении уровней сигнала к уровню принимаемых помех может составлять величину не менее 20 дБ при умеренном числе излучателей и частотных каналов. Увеличения отношения сигнал/помеха можно добиться как увеличением количества излучателей, так и числа частотных каналов. В частности увеличение количества частотных каналов от 2 до 30 при фиксированном количестве излучателей антенной решетки и постоянстве относительной ширины полосы частот приводит к росту отношения сигнал/помеха для наихудшего случая от значения 11дБ до 23дБ. При этом достигаемое подавление помехи в направлении настройки значительно выше и ограничено только влиянием дестабилизирующих факторов.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность результатов проведенной работы можно квалифицировать как решение актуальной задачи повышения энергетического потенциала и помехозащищенности линии связи с беспилотным летательным аппаратом, на основе использования антенных решеток с диаграммами направленности, синтезированными по широкополосному сигналу.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе проведенного анализа определены требования к характеристикам направленности бортовых и наземных антенн средств связи, исходя из условий конкретного применения БЛА. Разработаны методики определения оптимальных ДН.
2. Предложено использование в качестве бортовых антенн средств связи с широкополосными сигналами антенных решеток, с синтезированными ДН. Определены оптимальные значения весовых коэффициентов для случаев управляемых и неуправляемых ДН в режимах приема и передачи. Показана возможность повышения потенциала линии связи и ослабления влияния помех от соседних источников.
3. Предложено использование антенных решеток с синтезированными ДН в наземной аппаратуре средств связи с ШП сигналами. Предложено осуществлять синтезирование их диаграмм направленности при совместном выборе весовых коэффициентов пространственно-частотной обработки и спектрального состава используемых сигналов. Для этих условий показана возможность эффективной селекции излучений от нескольких источников, без ослабления приема полезного сигнала. Также показана возможность повышения потенциала связи.
4. На основании проведенного анализа получены количественные оценки для типичного числа излучателей, типичного числа используемых частотных каналов и размеров и форм БЛА среднего класса. Показано, что использование методов синтеза ДН бортовых антенн позволяет повысить потенциал связи до 13 дБ для управляемых и до 13 дБ ослабить

влияние интерференционных провалов для неуправляемых ДП. А также практически полностью исключить влияние помехи за счет антенного фактора. Использование техники синтеза ДН антенн наземной аппаратуры позволяет для решеток из 6-12 излучателей и 6-12 частотных каналов повысить потенциал связи до 11 дБ, а также увеличить отношение сигнал/помеха до 18 дБ. Полученные зависимости могут использоваться как рекомендации при проектировании средств связи с ЦП сигналами.

5. Выработаны рекомендации по практическому осуществлению процедур оптимизации для бортовых антенн, с учетом влияния объекта установки, и наземных антенн, с учетом взаимной связи излучателей в решетке.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, определённых ВАК

1. Сагадеев, Г.И. Синтезирование направленных свойств антенн для радиосредств воздушной подвижной связи, использующих широкополосные сигналы / Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. – Т.10, №2. – С. 21-26.
2. Сагадеев, Г.И. Пространственно-частотная фильтрация широкополосных сигналов в системах с фазированными антенными решетками / Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – Т.6, №2. – С.99-104.

Работы, опубликованные в других изданиях

3. Сагадеев, Г.И. Об одном способе определения требуемой диаграммы направленности антенны летательного аппарата / Г.И. Сагадеев, Юсиф С. Юсиф // Тезисы докладов Всероссийской (с международным участием) молодежной научной конференции «XII Туполевские чтения». – Т. IV. – 2004. – Казань. – С.78.
4. Сагадеев, Г.И. Устранение интерференционных провалов диаграмм направленности антенн систем воздушной подвижной связи / Г.И. Сагадеев // Тезисы докладов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «VIII Королевские чтения». – 2005. – Самара. – С.76.
5. Сагадеев, Г.И. Оптимизация диаграмм направленности антенн систем связи с широкобазовыми сигналами / Г.И. Сагадеев // Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции, посвященной 1000-летию города Казани «Туполевские чтения». – 2005. – Казань. – С.87-88.
6. Сагадеев, Г.И. Оптимизация антенн радиотрассы связи с воздушным судном / Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников, Юсиф С. Юсиф // Труды Первой научно-технической конференции зарубежных аспирантов и магистрантов. – 2005. – Казань. – С.88.
7. Сагадеев, Г.И. Оптимизация антенн информационно-измерительной аппаратуры ДПЛА с использованием методов математического моде-

- лирования / Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников, Юсиф С. Юсиф // Сборник трудов Восемнадцатой международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – 2005. – Казань. – С.116-118.
8. Сагадеев, Г.И. Анализ и оптимизация характеристик антенн радиолиний связи с ДПЛА / Г.И. Сагадеев, Юсиф С. Юсиф // Труды IV Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2005. – Н.Новгород. – С.188.
9. Сагадеев, Г.И. Диаграмма направленности антенны радиосвязи с беспилотным летательным аппаратом, синтезированная по широкополосному сигналу / Г.И.Сагадеев // Материалы Международной молодежной научной конференция «XIV Туполевские чтения». – Т.5. – 2006. – Казань. – С.103-105.
10. Сагадеев, Г.И. Использование антенн с диаграммой направленности, синтезированной по широкополосному сигналу, для средств радиосвязи с беспилотным летательным аппаратом. / Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников // Материалы международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование». – 2006. – Казань. – С.220-221.
11. Сагадеев, Г.И. Синтез диаграммы направленности антенной системы ДПЛА с использованием широкополосных сигналов / Г.И. Сагадеев // Труды VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2007. – Казань. – С.190-191.
12. Сагадеев, Г.И. Использование широкополосных сигналов для синтеза диаграммы направленности антенной системы беспилотного летательного аппарата / Г.И. Сагадеев // Материалы международной молодежной научной конференции «XV Туполевские чтения». – 2007. – Казань. – С.88.
13. Сагадеев, Г.И. Пространственно-частотная фильтрация широкополосных сигналов антенными решетками / Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников // Электронное приборостроение. – 2008. – Выпуск 1(52). – Казань. – С.63-68.
14. Булатов, М.М. Анализ эффективности антенных решеток, синтезированных по широкополосному сигналу / М.М. Булатов, Г.И. Сагадеев, Ю.Е. Седельников // Тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – 2008. – Казань. – С.311-312.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отг. 0,93. Уч. изд. л. 0,91.
Тираж 100. Заказ М1.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, Казань, К.Маркса, 10

